

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-338–352

УДК 621

## Эффективность работы газоперекачивающих агрегатов

Е. И. Купреев<sup>1)</sup>, Н. Б. Карницкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Надежность работы газотранспортной сети ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» зависит от эффективности работы газоперекачивающих агрегатов. Трубопроводный транспорт находится на первом месте среди всех остальных способов доставки газа, поскольку таким образом обеспечивается равномерная и бесперебойная поставка газа при минимальных издержках. К основным объектам магистральных газопроводов относятся технологические участки, включающие несколько компрессорных станций, и участки магистрали между ними. В настоящее время значительная часть основного оборудования газовой промышленности приближается к своему предельному сроку эксплуатации, из-за чего происходит снижение энергетической эффективности и надежности газотранспортной системы. На компрессорных станциях ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» находятся в эксплуатации более 4000 газоперекачивающих агрегатов, из них порядка 80 % с газотурбинным приводом. Понятно, что на привод таких агрегатов затрачивается значительная доля перекачиваемого газа. В течение многих лет компания инвестирует и активно участвует в создании современных газоперекачивающих агрегатов, широко используя конверсионный потенциал стран СНГ. В последнее время активно применяется комплексный подход к оценке надежности и эффективности объектов магистральных газопроводов на основе математического моделирования. В сочетании с развитием компьютерных средств диспетчерского контроля и управления это открывает широкие возможности для повышения энергоэффективности магистрального транспорта газа на основе математических моделей и технологических процессов. Получение реального эффекта основано на фактическом состоянии эксплуатационных характеристик оборудования, которые необходимо контролировать во времени и уточнять.

**Ключевые слова:** газоперекачивающие агрегаты, энергоэффективность, магистральные газопроводы, компрессорные станции, надежность, математическое моделирование

**Для цитирования:** Купреев, Е. И. Эффективность работы газоперекачивающих агрегатов / Е. И. Купреев, Н. Б. Карницкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 4. С. 338–352

---

### Адрес для переписки

Карницкий Николай Борисович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-91-45  
tes\_bntu@tut.by

### Address for correspondence

Karnitzki Nicolai B.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-91-45  
tes\_bntu@tut.by

---

## The Efficiency of Gas-Pumping Units

E. I. Kupreev<sup>1)</sup>, N. B. Karnitzki<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> JSC “Gazprom Transgaz Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup> Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The reliability of the gas transmission network of the JSC “Gazprom Transgaz Belarus” depends on the efficiency of gas compressor units. Pipeline transport takes the first place among all the other ways to deliver gas because it ensures a uniform and uninterrupted supply of gas at minimum costs. The main objects of main gas pipelines include process areas, including several compressor stations and sections of the pipeline between them. Currently, a significant part of the main equipment of the gas industry is approaching its deadline of operation, which causes decrease in energy efficiency and reliability of the transmission system. At compressor plants of the JSC “Gazprom Transgaz Belarus” there are more than 4000 gas compressor units in operation including about 80% ones with gas turbine drives. It is clear that the drives of these units take a significant proportion of the pumped gas. For many years the company invests and actively participates in the creation of modern gas-pumping units practicing the wide use of conversion potential of the CIS countries. In recent years, a comprehensive approach to the assessment of the reliability and efficiency of objects of gas pipelines on the basis of mathematical modeling is actively applied. Together with the development of computer supervisory and control this opens up opportunities to improve energy efficiency in pipeline transport of gas on the basis of mathematical models and processes. The real effect obtaining is based on the actual performance of the equipment that needs to be monitored over time and to clarify.

**Keywords:** gas compressor units, energy efficiency, natural gas pipelines, compressor stations, reliability, mathematical modeling

**For citation:** Kupreev E. I., Karnitzki N. B. (2016) The Efficiency of Gas-Pumping Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 338–352 (in Russian)

### Введение

Концептуально газоперекачивающий агрегат (ГПА) состоит из: воздушного компрессора, камеры сгорания, газовой турбины, силовой турбины, приводящей в движение компрессор для перекачки природного газа.

Простейшая камера сгорания газотурбинной установки (ГТУ) (рис. 1) состоит из топливораздающего устройства, регистра первичного воздуха, пламенной трубы и смесителя, которые размещаются в корпусе. Корпус нагружен давлением изнутри. Топливораздающее устройство (горелка или форсунка) подает топливо в зону горения. Весь воздух, подаваемый в камеру сгорания, разделяется на два потока. Меньшая часть воздуха (первичный воздух) в количестве, необходимом для поддержания процесса горения, поступает через регистр в зону горения. Большая часть воздуха (вторичный воздух) в процессе горения не участвует, а проходит между корпусом и пламенной трубой, охлаждая ее. Затем, пройдя через смеситель, этот воздух перемешивается с продуктами сгорания в зоне смешения, охлаждая их до заданной температуры.

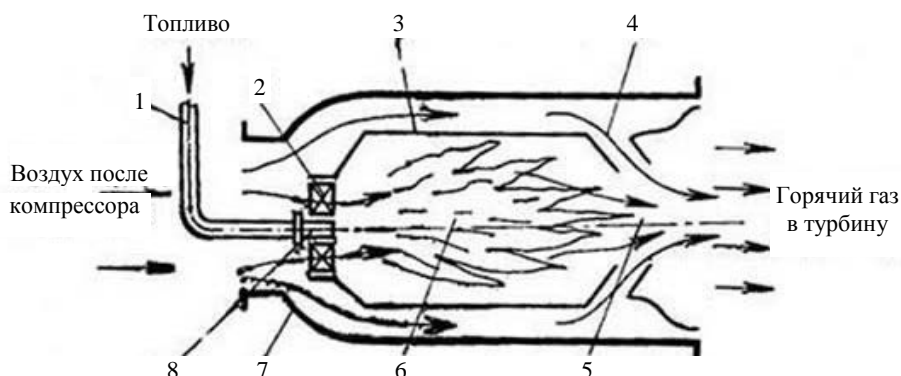


Рис. 1. Простейшая камера сгорания: 1 – подвод топлива; 2 – регистр;  
 3 – пламенная труба; 4 – смеситель; 5 – зона смешения; 6 – зона горения; 7 – корпус;  
 8 – топливораздающее устройство (форсунка)

Fig. 1. The simplest combustion chamber: 1 – fuel inlet; 2 – register;  
 3 – a fire tube; 4 – mixer; 5 – mixing zone; 6 – combustion zone; 7 – housing;  
 8 – fuel infusion device (injector)

Секционные (многотрубчатые) камеры сгорания представляют собой конструкцию, в которой объединены несколько (6–16) параллельно работающих цилиндрических камер (секций), часто связанных между собой пламяпередающими патрубками. Секция многотрубчатой камеры сгорания, представленная на рис. 2, состоит из пламенной трубы и кожуха. Пламенная труба включает в себя головку (лопаточный завихритель плюс тарелки и конус) и корпус, состоящий из цилиндрической части и двух конических участков, соединенных между собой конусным кольцом.

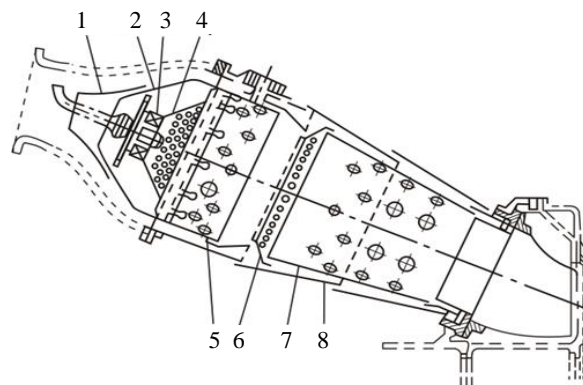


Рис. 2. Секция многотрубчатой камеры сгорания: 1 – входной кожух; 2 – тарелка;  
 3 – лопаточный завихритель; 4 – конус; 5 – цилиндрическая часть; 6 – конусное кольцо;  
 7 – пламенная труба; 8 – кожух

Fig. 2. Section of plenty-of-pipes combustion chamber: 1 – inlet casing; 2 – plate;  
 3 – vane swirler; 4 – cone; 5 cylindrical portion; 6 – cone ring;  
 7 – fire tube; 8 – a casing

Секционные камеры сгорания отличаются компактностью, обеспечивают высокую полноту сгорания топлива и устойчиво работают в различных

эксплуатационных условиях. Недостатком их являются сравнительно большие потери давления (2,5–7,5 %).

В кольцевых камерах сгорания (рис. 3) зона горения I имеет форму кольцевой полости обычно шириной 150–200 м, которая образуется цилиндрами 1 и 2. Два других соосно расположенных цилиндра составляют кожух камеры. Первичный воздух через воздухопроводящее устройство поступает в зону горения I. Вторичный воздух направляется по кольцевым зазорам и к смесительным насадкам, через которые поступает в зону II, где смешивается с продуктами сгорания, понижая тем самым их температуру. В воздухоподводящем устройстве на входе в зону горения I по всей окружности расположены форсунки. За счет этого обеспечиваются хорошее перемешивание топлива с воздухом и горение по всему кольцевому пространству. Число форсунок может достигать 10–20, но иногда это бывает одна вращающаяся форсунка.

Объемная теплонапряженность у кольцевых камер примерно такая же, как и у секционных, а потери давления несколько больше (до 10 %). По сравнению с секционными камерами они имеют меньший рабочий объем и более равномерное поле температур газа на выходе. Зато кольцевые камеры сложнее в изготовлении и доводке, труднодоступны для осмотра в ходе эксплуатации.

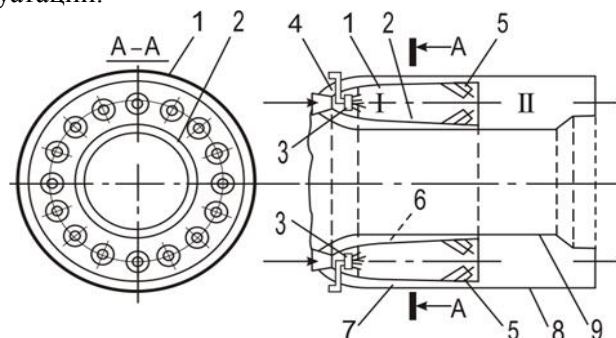


Рис. 3. Секция кольцевой камеры сгорания: 1, 2 – цилиндр; 3 – форсунка;  
4 – воздухопроводящее устройство; 5 – смесительная насадка;  
6, 7 – кольцевой зазор; 8, 9 – соосный цилиндр

Fig. 3. A section of an annular combustion chamber: 1, 2 – cylinder; 3 – injectors;  
4 – air duct device; 5 – mixing nozzle;  
6, 7 – annulus; 8, 9 – coaxial cylinder

Трубчато-кольцевая камера сгорания (рис. 4) представляет собой конструктивное совмещение элементов секционной и кольцевой камер. Так же как и у кольцевой камеры, кожух ее образуется наружным и внутренним соосно расположенными цилиндрами. А в кольцевом пространстве между этими цилиндрами размещается ряд отдельных пламенных труб, снабженных форсунками. Трубы соединяются друг с другом пламяпередающими патрубками, которые предназначены для передачи пламени, зажигания и выравнивания давления между трубами. Трубчато-кольцевые камеры имеют теплонапряженность и потери давления приблизительно такие же,

как и секционные камеры. Они компактнее кольцевых камер и более просты в доводке. Небольшие размеры пламенных труб упрощают их изготовление и разборку [1].

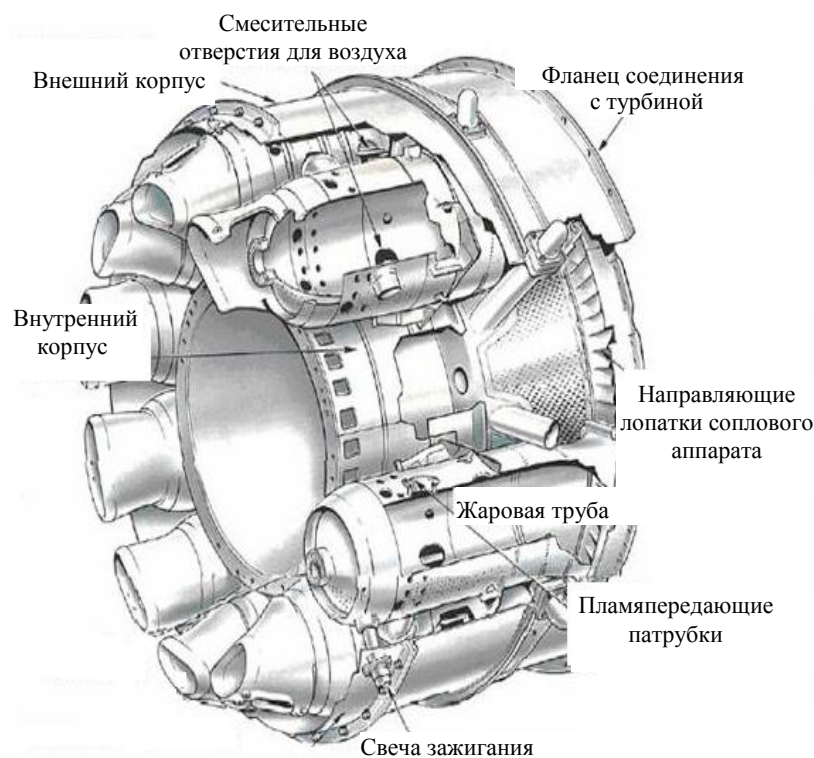


Рис. 4. Трубчато-кольцевая камера сгорания

Fig. 4. Tubular-annular combustion chamber

### Проблемы и пути их решения

Проблемы, связанные с эксплуатацией камер сгорания, поставили перед исследователями задачи, цель которых – повышение надежности конструкции камер сгорания и увеличение срока их службы.

От качества изготовления камеры сгорания зависит качественный состав поступающей в нее смеси газа с кислородом, что является одним из важнейших факторов для достижения максимального КПД турбины. Срок службы камеры сгорания определяется:

- температурой сгорания топливно-воздушной смеси;
- надежностью системы охлаждения стенок жаровой трубы;
- высокой термической устойчивостью материалов, из которых она изготовлена.

Снижение температурных нагрузок на стенки жаровой трубы и сопловый аппарат турбины обусловлено применяемыми технологиями горения (охлаждение стенки камер сгорания, понижение температуры продуктов сгорания, снижение температуры горения и уровня эмиссии различных веществ в камерах сгорания). Надежная система охлаждения стенки жаровой трубы определяется используемыми схемами охлаждения, размерами от-

верстий для воздушного потока, поступающего в зону разбавления, и порядком их размещения. Конструирование высокотемпературных деталей машин и механизмов неразрывно связано с созданием новых материалов, к которым относятся стойкие к термоударам покрытия, выполненные на подложках из жаростойких сплавов.

Немаловажное влияние оказывают своевременные осмотры, диагностика и ремонты, а также современное оборудование и технологии. Важными являются снижение образования  $\text{NO}_x$  при сжигании природного газа в камерах сгорания ГТУ, разработка новых видов горелочных устройств, реконструкция камер сгорания и горелочных устройств, направленных на увеличение КПД, снижение расхода топлива и увеличение полноты сгорания топлива за счет уменьшения объема горения с максимальным уровнем температуры, химические методы очистки дымовых газов. Этот вывод подтверждается результатами многочисленных исследований режимов работы ГТУ на магистральных газопроводах [2, 3].

В связи с тем что агрегаты ГТУ работают в течение многих сотен и тысяч часов без остановки, большое значение имеет диагностика состояния отдельных узлов этих агрегатов, т. е. оценка текущего состояния и предсказание хода изменения их основных характеристик на перспективу. Одним из основных узлов ГТУ, как уже отмечалось ранее, является камера сгорания, от надежности работы которой зависит надежность работы всего агрегата. Согласно теории горения, при фиксированных внешних условиях процесс горения может протекать в стационарном режиме, когда основные характеристики (скорость реакции горения, мощность тепловыделения, температура газа и состав продуктов) не изменяются во времени, либо в периодическом режиме, когда эти характеристики колеблются около своих средних значений. Вследствие явно выраженной нелинейной зависимости скорости реакции от температуры горение отличается высокой чувствительностью к внешним условиям [4]. Нелинейная теория разрушения нержавеющей стали, работающих при повышенных температурах, показывает, что одной из причин их разрушения являются термофлуктуации [5].

Из сказанного следует, что чем выше стабильность горения в камере сгорания, тем меньшим разрушениям она подвергается. Существует много способов контроля режима горения в ГТУ. Наиболее близким аналогом по совокупности существенных признаков является способ контроля изменения концентрации окислов азота в выхлопных газах ГТУ по патенту РФ № 2006751 [6]. Этот патент авторы статьи выбрали за прототип. Недостатками прототипа являются: недостаточная точность, поскольку не учитывается разброс параметров газов для разных типов двигателей, а также концентрация газов, которая вычисляется по определенной формуле, а не измеряется непосредственно. Необходимо создание простого, точного и не требующего установки дополнительного оборудования способа диагностики камеры сгорания ГТУ на установившемся режиме.

### **Методики проведения экспериментов и обработки опытных данных**

Для решения поставленной задачи при проведении диагностики камеры сгорания ГТУ на установившемся режиме: измеряют параметры газов в выхлопной шахте, проводят обработку результатов измерений с помощью

методов математической статистики, судят о состоянии камеры сгорания по отклонению этих результатов от эталонных величин. В качестве параметров газов в выхлопной шахте выбирают температуру газов и концентрацию в них продуктов сгорания [7]. Методика позволяет при обработке результатов измерений определять стандартные отклонения температуры газов и концентраций продуктов сгорания, а в качестве эталонной величины для сравнения выбирать значение стандартных отклонений температуры газов и концентраций продуктов сгорания, которое предлагается определять по результатам измерений этих величин для каждого типа двигателя от начала его эксплуатации до завершения. Дополнительным отличием является то, что при расчете концентраций продуктов сгорания предлагается определять концентрации оксида углерода и оксидов азота в течение 20 мин, проводя последовательно пять измерений.

### Результаты исследования и их анализ

В течение года выполнялись экологические измерения на установившихся режимах работы ГПА в соответствии с Инструкцией ОАО «Газпром» по проведению контрольных измерений вредных выбросов газотурбинных установок на компрессорных станциях [7]. Для этих целей используются газоанализаторы Testo 350 или Testo 350XL, позволяющие проводить измерения концентрации кислорода, оксидов азота, оксида углерода и температуры в точке пробоотбора ГПА. Собрано большое количество результатов измерений вредных выбросов для разных видов ГТУ. В результате их анализа выявлено, что оценку стабильности горения можно производить по отклонению концентраций продуктов сгорания от средних концентраций этих продуктов за определенный промежуток времени. Удобно такое отклонение оценивать, пользуясь методами математической статистики, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Математическая обработка результатов измерений**  
**Mathematical processing of measurement results**

$\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i$	Среднее арифметическое результатов отдельных измерений $x_i$
$D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$	Дисперсия
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	Стандартное отклонение единичного определения
$t = (x - \mu) / S$	Критерий Стьюдента, $\mu$ – истинное значение параметра
$\delta = \frac{tS}{\sqrt{n}},$ при $n = 5$ и 95 % доверительной вероятности $t = 2,78$ , тогда $\delta = \frac{2,78}{\sqrt{5}} xS = 1,24S$ , $\bar{x} - \frac{tS}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{tS}{\sqrt{n}}$ или $\bar{x} - 1,24S \leq \mu \leq \bar{x} + 1,24S$	Размеры доверительного интервала

Предлагаемый способ осуществляют следующим образом:

- предварительно для каждого типа двигателей ГТУ на основании собранных статистических данных вычисляются эталонные значения стандартных отклонений температур и концентраций продуктов сгорания;
- производятся в течение 20 мин пять последовательных измерений концентраций продуктов сгорания (оксида углерода и оксидов азота) и температуры в выхлопной шахте ГПА с применением переносного газоанализатора Testo 350XL или аналога;
- определяются стандартные отклонения состава продуктов сгорания и температуры от их среднего значения за 20-минутный интервал;
- производится сравнение полученных стандартных отклонений с эталонными значениями стандартных отклонений.

Для газотурбинной установки критериями установившегося режима являются:

- частота вращения газогенератора и силовой турбины (отличается на  $\pm 20$  об/мин);
- температура газа газогенератора и силовой турбины (отличается на  $\pm 3$  °C с выдержкой по времени 20–30 мин) [8–10].

Концентрации оксида углерода и оксидов азота для анализа стабильности продуктов сгорания выбраны как наиболее быстро меняющиеся составляющие выхлопных газов и сильно зависящие от температуры в камере сгорания, а также от изменений в ней. Стабильность температуры в камере сгорания идентична стабильности температуры в выхлопной шахте, так как при установившемся потоке выхлопных газов и стабильности внешних метеорологических параметров, что обуславливается 20-минутным интервалом проведения измерений, приводит к стабильности тепловых потерь при движении газового потока от камеры сгорания до точки пробоотбора на выхлопной шахте.

Математическая обработка результатов измерений – нахождение среднего значения параметра, дисперсии, стандартного отклонения, выбор критерия Стьюдента и определение размеров доверительного интервала (табл. 1) – позволяет в течение 10 мин (длительность ввода результатов пяти измерений) получать набор стандартных отклонений по продуктам сгорания и температуре газов в выхлопной шахте. Стандартное отклонение для анализа стабильности выбирали произвольным образом. Оно, в отличие от дисперсии, позволяет умножением ее на коэффициент 1,24 (пять измерений и 95%-я доверительная вероятность) получить численное значение величины отклонения. Например, если  $St = 1,00$ , то колебание температуры газа в выхлопной шахте и в камере сгорания около среднего значения за 20-минутный период составит  $\pm 1,24$  °C.

В течение года проводили измерения вредных выбросов от ГПА типа Solar со стационарным двигателем Таурус-60С на разных режимах работы осевого компрессора. Первые измерения выполняли после регламентных работ по техническому обслуживанию (РТО). Результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и темпера-



туре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора в процентах от номинального значения  $n_{ок}$  для ГПА № 1, 2, 3 представлены в табл. 2–4 соответственно.

Таблица 2

**Стандартные отклонения по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 1**

**The standard deviation in  $S_{CO}$  carbon monoxide,  $S_{NOx}$  nitrogen oxides and  $S_T^\circ$  temperature depending on the operating time of the engine and the speed of the axial compressor for ГПА Solar No 1**

Обороты осевого компрес- сора $n_{ок}$ , %	Наработка двигателя, ч											
	23200			25300			26800			27700		
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$
90	0,78	0,73	0,63	0,34	0,87	1,00	0,82	0,48	1,00	0,83	0,49	0,79
91				0,64	0,28	0,95	0,53	0,90	1,06			
92				0,48	0,62	0,64	0,96	0,37	0,60			
93				0,87	0,90	0,73	0,82	0,69	0,78			
94				0,46	0,37	0,81	0,90	0,43	0,86			
95	0,56	0,92	0,84	0,45	0,68	1,10	0,88	0,73	1,21	0,95	1,16	1,56
96				0,78	0,39	1,23	0,99	0,78	1,46			
97				0,88	0,92	0,83	1,03	1,19	1,31			
98				0,76	0,96	1,18	1,22	1,34	1,09			
99	0,19	0,89	0,90	0,96	0,89	1,32	0,98	1,00	1,24	1,12	1,26	1,34

Таблица 3

**Стандартные отклонения по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 2**

**The standard deviation in  $S_{CO}$  carbon monoxide,  $S_{NOx}$  nitrogen oxides and  $S_T^\circ$  temperature depending on the operating time of the engine and the speed of the axial compressor for ГПА Solar No 2**

Обороты осевого компрес- сора $n_{ок}$ , %	Наработка двигателя, ч											
	24600			26100			27300			28500		
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$
90	0,68	0,60	0,46	0,84	0,71	0,69	0,56	0,70	0,80	0,72	0,49	0,57
91				0,71	0,00	0,39	0,74	0,56	0,86			
92				0,56	0,56	1,00	0,41	0,68	0,70			
93				0,84	0,66	1,13	0,62	0,78	0,72			
94				0,52	0,24	1,12	0,78	0,65	0,81			
95	0,72	0,86	0,92	0,80	0,38	0,82	0,84	0,79	0,78	0,48	0,70	0,88
96				0,76	0,68	0,70	0,48	0,82	0,70			
97				0,50	0,78	1,00	0,56	0,72	1,00			
98	0,80	0,48	0,64	0,00	0,90	1,00	0,69	0,90	0,96			
99				0,72	0,58	1,18	0,78	0,81	0,82	0,86	0,56	0,78

Таблица 4

**Стандартные отклонения по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 3**  
**The standard deviation in  $S_{CO}$  carbon monoxide,  $S_{NOx}$  nitrogen oxides and  $S_T^\circ$  temperature depending on the operating time of the engine and the speed of the axial compressor for ГПА Solar No 3**

Обороты осевого компрес- сора $n_{ок}$ , %	Наработка двигателя, ч											
	22800			24900			26200			26300		
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$
90	0,88	0,78	1,12	0,82	0,78	0,99	1,26	1,20	1,13			
91				0,80	1,12	0,83	1,14	0,91	1,88	0,64	0,42	0,54
92				1,06	0,86	1,10	0,82	0,88	1,12			
93				0,94	0,78	1,00	0,72	1,49	1,37			
94				0,78	0,74	0,88	0,98	0,85	1,24			
95	0,90	0,76	0,85	1,08	1,02	0,82	1,27	1,36	1,04	0,56	0,48	0,65
96				0,96	0,68	1,14	0,94	0,89	1,98			
97				1,11	0,98	1,27	0,86	1,14	1,38			
98	0,83	0,68	1,20	0,80	0,90	1,18	0,99	1,00	1,27			
99				0,92	1,02	1,17	1,22	1,37	1,69	0,33	0,61	0,43

Анализ стандартных отклонений для ГПА № 1 показывает, что после 23200 ч наработки двигателя значения всех стандартных отклонений на всех режимах работы двигателя меньше 1,0. После наработки 25300 ч на режимах  $n_{ок}$  более 95 % стандартные отклонения по температуре выхлопных газов становятся больше 1,0. Нароботка двигателя в 26800 ч приводит к появлению значений стандартных отклонений по оксидам азота и оксиду углерода и температуры при  $n_{ок}$  более 97 %, больших 1,0. При наработке 27700 ч полученные закономерности сохраняются, продолжается дальнейший рост всех стандартных отклонений. На основании этого анализа можно дать рекомендации: эксплуатировать ГПА № 1 на режимах работы осевого компрессора 90–93 % до проведения РТО представителями фирмы Solar.

Для ГПА № 2 стандартные отклонения по оксиду углерода и оксидам азота за все время эксплуатации от 24600 до 28500 ч не превышали 1,0, по температуре незначительные превышения наблюдались при наработке 26100 ч. Выводы: ГПА № 2 в проведении РТО не нуждается, эксплуатировать можно на всех режимах.

Для ГПА № 3 стандартные отклонения по температуре, большие 1,0, наблюдались при наработке двигателя 22800 ч. При наработке 24900 ч стандартные отклонения, большие 1,0, наблюдались по всем контролируемым параметрам. При наработке 26200 ч произошел дальнейший рост стандартных отклонений по оксидам углерода, они на отдельных режимах достигли 1,3, по оксидам азота – 1,5, по температуре – 2,0. При наработке 26300 ч провели РТО, и стандартные отклонения по всем параметрам стали меньше 1,0.

На основании полученных данных по стабильности продуктов сгорания и температуры для ГПА типа Solar можно рекомендовать в качестве эталонных значений:

• все стандартные отклонения  $S$  меньше 1,0, состояние камеры сгорания и газовоздушного тракта хорошее, значения  $S$  по температуре больше 1,0, по оксиду углерода и оксидам азота близки к 1,0 – состояние хорошее, но следует увеличить частоту контроля вредных выбросов и применить другие методы диагностики;

• значения  $S$  по температуре, оксиду углерода и оксидам азота больше 1,0, но меньше 1,3 – состояние удовлетворительное, следует проводить эксплуатацию на отдельных режимах;

• значения  $S$  по температуре близки к 2,0, по оксиду углерода и оксидам азота – к 1,5 – состояние неудовлетворительное, следует проводить РТО.

Результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки стационарного двигателя с начала эксплуатации, после последнего капитального ремонта и с момента проведения РТО, для числа оборотов турбины низкого давления  $N_{тнд}$  для ГПА типа ГТК-5 № 1, 2, 3, 4 представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Стандартные отклонения по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов турбины низкого давления для ГПА типа ГТК-5**

**The standard deviation in  $S_{CO}$  carbon monoxide,  $S_{NOx}$  nitrogen oxides and  $S_T^\circ$  temperature depending on the operating time of the engine and the speed of the low pressure turbine for ГПА ГТК-5**

ГПА	$N_{тнд}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$
		Наработка двигателя с начала эксплуатации/после капремонта/после РТО, ч											
		44000/50/0			46000/2100/500			47700/3900/300			50500/6700/100		
№ 1	4400							0,58	0,51	1,67	1,10	1,12	1,47
	4600				0,56	0,84	1,18	0,83	0,56	0,86	0,44	1,16	1,63
	4800	0,68	0,64	0,98				1,00	1,00	1,65	1,00	1,12	1,12
	5000	0,43	0,31	1,00									
№ 2		62900/3100/100			6600/6200/300			68400/8000/900			70500/10100/150		
	4400	1,06	0,92	0,84	0,64	1,04	1,32				0,56	1,16	1,58
	4600	0,76	0,97	1,28	0,62	0,67	1,54	0,90	0,73	1,71	1,12	0,81	1,75
	4800	1,08	0,33	1,62	0,86	1,14	1,39	1,51	1,33	1,84	0,87	1,24	1,85
	5000							1,00	1,00	1,69			
№ 3		49200/600/0			50800/2200/500			52800/4200/600			54600/6000/200		
	4400	0,74	0,44	1,16							0,69	0,27	1,39
	4600	0,50	0,44	1,23	0,64	0,57	1,15	1,15	1,14	1,62	0,56	0,44	1,14
	4800	0,48	0,73	1,17	0,84	0,81	1,68	0,74	0,94	1,78	0,86	0,54	1,25
	5000	0,52	0,39	1,20	0,59	0,60	1,27	0,72	0,65	1,29	0,78	0,62	1,61
№ 4		65000/1500/0			67000/3500/100			68900/5400/100			70600/7100/400		
	4400	0,82	0,54	0,98	0,74	0,45	1,06	0,78	1,07	1,28	1,18	0,84	1,76
	4600	0,62	0,68	1,06	0,62	0,64	1,06	0,92	0,97	1,37	0,73	0,72	1,32
	4800	0,57	0,64	1,17	0,72	0,83	1,12	1,17	0,68	1,00	0,86	1,11	1,78
	5000	0,73	0,59	0,91	0,38	0,49	0,93	0,82	0,85	1,34	1,06	0,74	1,84

Для всех ГПА независимо от времени эксплуатации и времени, прошедшего с последнего капитального ремонта или с проведения РТО, характерным является постепенное возрастание стандартного отклонения по

температуре выхлопных газов от 1,0 до 1,8. Стандартные отклонения по оксиду углерода и оксидам азота при эксплуатации до 3000 ч после капитального ремонта имеют значения меньше единицы, после 3000 ч возрастают больше единицы и на отдельных режимах работы двигателя достигают 1,3, и значения выше этой величины не наблюдается. Также для двигателей данного типа при наработке более 6000 ч отмечается стабильность величины стандартного отклонения по температуре выхлопных газов, поэтому решение о времени выполнения ТО или капитального ремонта по анализу стабильности продуктов сгорания и температуры затруднено. Тем не менее проведение анализа и получение указанных значений будут свидетельствовать о нормальном состоянии ГПА.

Результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки и мощности авиационного двигателя марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал» представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Стандартные отклонения по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^\circ$  в зависимости от времени наработки авиационного двигателя марки ПС-90ГП-2 и мощности  $W$  для ГПА-16 «Урал»**

The standard deviation in  $S_{CO}$  carbon monoxide,  $S_{NOx}$  nitrogen oxides and  $S_{T^{\circ}}$  temperature depending on operating time of aircraft engine (brand ПС-90П-2 and W power) for the ГПА-16 ("Ural")

[illegible]

При наработке двигателя для ГПА № 1 18500 ч произошло разрушение камеры сгорания. Значения стандартных отклонений, полученные при последних измерениях на этом ГПА, для оксида углерода достигает 3,0, для оксидов азота – 7,0, для температуры – 4,5. При наработке 8500 ч значения  $S$  по оксидам азота и углерода на одном из режимов становятся больше 1,0, а по температуре выхлопных газов – от 2,0 до 2,5. При эксплуатации ГПА 4100 ч значение  $S$  по оксидам азота и углерода меньше 1,0, а по температуре выхлопных газов больше 1,0.

Разрушение камеры сгорания двигателя ГПА № 2 и его замена произошли при наработке 14400 ч. Имеются результаты измерений продуктов сгорания при наработке двигателя 9700 ч. Расчет стандартных отклонений дает значения по оксидам азота от 1,3 до 1,7, по оксиду углерода – от 0,9 до 1,3, по температуре выхлопных газов – от 1,7 до 2,7. Стандартные отклонения при наработке двигателя 2500 ч по всем параметрам меньше 1,0. Новый двигатель при его эксплуатации 6400 ч имеет значение  $S$  по оксидам азота и оксиду углерода на отдельных режимах значения немногим больше 1,0, а по температуре – от 1,1 до 1,6.

Двигатель ГПА № 3 при эксплуатации 16900 ч имеет значение  $S$  по оксидам азота от 0,8 до 1,2, по оксиду углерода – от 1,3 до 1,1, по температуре выхлопных газов – от 1,3 до 1,8. При наработке двигателя до 12600 ч значения  $S$  по оксидам азота и оксиду углерода меньше 1,0, по температуре выхлопных газов – от 1,3 до 1,8.

Двигатель ГПА № 4 при наработке 2500 ч имеет значения  $S$  по оксидам азота до 2,6, по оксиду углерода – 1,7, по температуре – более 3; был заменен на новый из-за разрушения камеры сгорания. При наработке 9300 ч новый двигатель имел значения  $S$  по оксиду углерода не более 1,0, по оксидам азота – не более 1,1, по температуре – от 1,3 до 1,9.

Анализ стабильности продуктов сгорания от авиационных двигателей марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал» показывает возможность проведения ТО не по времени наработки, а по состоянию двигателя. Эталонные значения стандартных отклонений продуктов сгорания и температуры выхлопных газов, характеризующих состояние двигателя, приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Эталонные значения стандартных отклонений продуктов сгорания  
и температуры выхлопных газов, характеризующих состояние двигателя  
марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал»**

**The reference values of standard deviations of the combustion products  
and exhaust temperature characterizing the condition of the engine  
(brand ПС-90ГП-2 for the ГПА-16 “Ural”)**

Эталонные значения стандартных отклонений			Состояние двигателя, частота обследования
$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^\circ$	
Менее 1,0	Менее 1,0	Менее 1,0	Хорошее, 1500 ч
Менее 1,0	Менее 1,0	Более 1,3	Хорошее, 1000 ч
1,0–1,3	1,0–1,3	1,3–1,8	Удовлетворительное, 500 ч
1,3–3,0	1,3–3,0	1,8–3,0	Условно-удовлетворительное, 250 ч
Более 3,0	Более 3,0	Более 3,0	Неудовлетворительное

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные типы камер сгораний, их преимущества и недостатки. Проведено исследование газоперекачивающего агрегата на разных режимах. Анализ состояния двигателя проведен путем сравнения эталонных значений стандартных отклонений по оксиду углерода, оксидам азота и температуре выхлопных газов со стандартными отклонениями, полученными при диагностическом обследовании.

2. Предлагаемый способ удобен для практического применения, потому что:

- диагностика оборудования по предлагаемому способу может проводиться непосредственно персоналом компрессорной станции после прохождения небольшого обучения;
- легко реализуем, что связано с использованием простого, доступного и относительно недорогого оборудования;
- позволяет получить необходимый набор статистических данных, на основании которых возможно быстро сделать диагностические выводы об эффективности работы газоперекачивающего агрегата и дать рекомендации о режимах его использования;
- в связи с отсутствием жестких требований в использовании высококвалифицированных специалистов комплексное использование предлагаемого способа с имеющимися выводами по вибро- и параметрической диагностике позволит значительно увеличить надежность заключений о состоянии газоперекачивающего агрегата, сократить количество аварий, перейти от эксплуатации газоперекачивающего агрегата с его техническим обслуживанием на эксплуатацию данного агрегата «по состоянию», а это существенно снизит трудозатраты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев, П. С. Вопросы рациональной эксплуатации газотурбинных установок / П. С. Пономарев. Уфа: ГОУ ВПО УГНТУ, 2003. 88 с.
2. Козаченко, А. Н. Энергетика трубопроводного транспорта газов / А. Н. Козаченко, В. И. Никишин, Б. П. Поршаков. М.: Нефть и газ, 2001. 400 с.
3. Газотурбинные установки на газопроводах / Б. П. Поршаков [и др.]. М: Нефть и газ, 2004. 216 с.
4. Калинин, А. Ф. Технологии промышленной подготовки и магистрального транспорта природного газа / А. Ф. Калинин. М.: МПА-ПРЕСС, 2007. 323 с.
5. Энергосберегающие технологии при магистральном транспорте природного газа / Б. П. Поршаков [и др.]. М.: МПА-ПРЕСС, 2006. 311 с.
6. Способ контроля изменения концентрации окислов азота в выхлопных газах газотурбинной установки: пат. № 2006751 РФ: МПК F23N5/24 / В. А. Щуровский, Ю. Н. Синицын, В. И. Корнеев, Е. Д. Никандров; дата публ.: 30.01.1994.
7. Инструкция по проведению контрольных измерений вредных выбросов газотурбинных установок на компрессорных станциях: СТО Газпром 2-3.5-038–2005. М., 2005.

8. Костюк, А. Г. Газотурбинные установки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Костюк, А. Н. Шерстюк. М.: Высш. шк., 1979. 254 с.
9. Белоконов, Н. И. Газотурбинные установки на компрессорных станциях магистральных газопроводов / Н. И. Белоконов, Б. П. Поршаков. М.: Недра, 1969. 112 с.
10. Поршаков, Б. П. Газотурбинные установки: учеб. для вузов / Б. П. Поршаков. М.: Недра, 1992. 238 с.

Поступила 05.02.2016    Подписана в печать 04.04.2016    Опубликовано онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

1. Ponomarev P. S. (2003) *Problems of the Rational Operation of Gas Turbine Plants*. Ufa: GOU VPO USPTU. 88 (in Russian).
2. Kozachenko A. N., Nikishin V. I., Porshakov B. P. (2001) *Energy of a Pipeline Transport of Gases*. Moscow, "Neft i Gaz" [Oil and Gas] Publishing House. 400 (in Russian).
3. Porshakov B. P., Apostolov A. A., Nikishin V. I. (2004) *Gas Turbines for Gas Pipelines*. Moscow, "Neft i Gaz" Publishing House. 216 (in Russian).
4. Kalinin A. F. (2007) *Technology of Processing and Pipeline Transmission of Natural Gas*. Moscow, MPA-PRESS. 323 (in Russian).
5. Porshakov B. P., Kalinin A. F., Kuptsov S. M., Lopatin A. S., Shotidi K. Kh. (2006) *Power Saving Technologies for Main Pipeline Transport of Natural Gas*. Moscow, MPA-PRESS. 311 (in Russian).
6. Shchurovskii V. A., Sinitsyn Iu. N., Korneev V. I., Nikandrov E. D. (1994) A Method for Controlling Changes in the Concentration of Nitrogen Oxides in Exhaust Gases of the Gas Turbine Plant. Russian Federation Patent No 2006751 (in Russian).
7. Standard of Gazprom Organization 2-3.5-038–2005. Instructions for Conducting the Checking Measurements of Hazardous Emissions of Gas Turbine Units at Compressor Plants. Moscow, 2005. 14 (in Russian).
8. Kostyuk A. G., Sherstyuk A. N. (1979) *Gas Turbine Units: Manual for Universities*. Moscow, Vysshaya Shkola. 254 (in Russian).
9. Belokon N. I., Porshakov B. P. (1969) *Gas Turbine Units at Compressor Plants of Main Gas Pipelines*. Moscow, Nedra. 112 (in Russian).
10. Porshakov B. P. (1992) *Gas Turbine Units*. Moscow, Nedra. 238 (in Russian).

Received: 05.02.2016

Accepted: 04.04.2016

Published online: 03.08.2016